

Analiza procesów filtracyjnych na złożach mineralnych stosowanych w filtrach naturalnych stawów kąpielowych

Analysis of filtration processes on mineral beds used in filters of natural swimming ponds

WOJCIECH WALCZAK, ARTUR SERAFIN, TADEUSZ SIWIEC

DOI 10.36119/15.2024.6.6

Naturalne stawy kąpielowe jako obiekty przeznaczone na potrzeby rekreacyjne charakteryzują się prostotą rozwiązań i znaczącym udziałem procesów naturalnych. Stawy budowane są z materiałów powszechnie dostępnych występujących w przyrodzie, a ich główną cechą jest stosowanie prostych technik uzdatniania wody z wykorzystaniem odpowiednich roślin oraz filtrowania wody przez materiał porowaty. Niniejsza praca poświęcona jest procesom filtracji wody z wykorzystaniem dwóch materiałów to jest: grysu wapiennego i opoki odpowiednio preparowanej o nazwie Rockfos®. Ze względu na konieczność filtrowania wody w warunkach przepływu grawitacyjnego celem badań było określenie relacji funkcyjnej strat hydraulicznych złoża zbudowanego z wybranego materiału w zależności od prędkości filtrowania wody. Znajomość tej funkcji pozwoli, przy zdanej ze względów technologicznych prędkości filtrowania określić wymaganą wysokość warstwy wody nad złożem. Badania obejmowały określenie: średnicy zastępczej i sferyczności ziaren w/w złóż, porowatości tych złóż w warunkach upakowania luźnego i zagęszczonego oraz zależności strat ciśnienia w funkcji prędkości filtracji. Określenie tych wartości jest podstawą do opracowania metodyki projektowania tych filtrów. Wykazano, że mnogość wzorów na obliczanie średnic zastępczych ziaren złóż „ d ” oraz sferyczności „ ψ ” wprowadza znaczne utrudnienie w modelowaniu strat ciśnienia w funkcji prędkości filtracji. Otrzymywane wartości liczbowe różnią się i poszczególne zestawy iloczynów „ $d\psi$ ” nie zawsze odzwierciedlają zależność zgodną z wynikami pomiarów. Stwierdzono, że wyniki modelu najbliższe wynikom pomiaru uzyskano przy wykorzystaniu średnic objętościowych i sferyczności obliczonej z uśrednionych wymiarów przestrzennych poszczególnych ziaren.

Słowa kluczowe: filtracja, naturalne stawy kąpielowe, średnice zastępcze, sferyczność, skała modyfikowana Rockfos®

Natural swimming ponds as facilities intended for recreational purposes are characterized by simplicity of solutions and a significant share of natural processes. Ponds are built from commonly available materials found in nature, and their main feature is the use of simple water treatment techniques using appropriate plants and filtering water through porous material. This work is devoted to water filtration processes using two materials, i.e. limestone grit and appropriately prepared rock called Rockfos®. Due to the need to filter water under gravity flow conditions, the aim of the research was to determine the functional relationship of hydraulic losses of the bed made of the selected material depending on the water filtering speed. Knowledge of this function will allow, given the filtering speed for technological reasons, to determine the required height of the water layer above the bed. The research included determining: the equivalent diameter and sphericity of grains in the above-mentioned deposits, the porosity of these deposits in loose and dense packing conditions, and the relationship between pressure losses and filtration speed. Determining these values is the basis for developing a methodology for designing these filters. It has been shown that the multitude of formulas for calculating the equivalent diameters of bed grains „ d ” and the sphericity „ ψ ” introduces significant difficulties in modeling pressure losses as a function of filtration speed. The obtained numerical values differ and individual sets of „ $d\psi$ ” products do not always reflect the relationship consistent with the measurement results. It was found that the model results closest to the measurement results were obtained using volume diameters and sphericity calculated from the average spatial dimensions of individual grains.

Keywords: filtration, natural swimming ponds, equivalent diameter, sphericity, prepared rock Rockfos®

Wprowadzenie

Naturalne stawy kąpielowe (naturpool, ekobaseny) to tanie w budowie i funkcjonowaniu sztuczne zbiorniki wodne,

atrakcyjne krajobrazowo, użytkowane rekreacyjnie, oddzielone od wód powierzchniowych i gruntowych, a ich cechą charakterystyczną jest brak zaawansowanych technik uzdatniania wody. Chemicz-

na dezynfekcja zastąpiona jest tu naturalnymi biofizyczno-chemicznymi mechanizmami uzdatniania wody związanymi z procesem samooczyszczania wód [8, 9]. Stanowią one, przy niewielkiej liczbie

mgr inż. Wojciech Walczak, dr hab. inż. Artur Serafin, prof. UP w Lublinie <https://orcid.org/0000-0003-4311-270X>

prof. dr hab. inż. Tadeusz Siwiec <https://orcid.org/0000-0002-4671-4602> – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Inżynierii Środowiska i Geodezji. Adres do korespondencji/ Corresponding author: tadeusz.siwiec@up.lublin.pl

osób kąpiących się prośrodowiskową alternatywę dla typowych basenów kąpielowych, które ze względu na dużą liczbę ludzi cechuje agresywna dezynfekcja chemiczna wody, często negatywnie wpływająca na zdrowie ludzi [21, 22, 50].

Typowy naturalny staw kąpielowy składa się z nieckii stawowej wypełnionej wodą, wyłożonej materiałem hydroizolacyjnym o wysokiej trwałości (PCV, EPDM, glina, bentonaty). Podzielony jest na dwie strefy o różnych funkcjach. Strefa regeneracji działa jako uzdatniający system mokradłowy (TWs), gdzie zachodzi biofizyczno-chemiczna sedymentacja zawieszin oraz mineralizacja związków organicznych. Jest płytka, obsadzona wyselekcjonowaną roślinnością wodną na odpowiednim podłożu mineralnym (filtr), co sprzyja organizacji mikroorganizmów biofilmu, a co za tym idzie skutecznej filtracji wody i osadów. Strefa kąpielowa jest odślonięta, głębsza i wykorzystywana do celów rekreacyjnych [8, 39, 50].

Efektywność uzdatniania wody strefy regeneracyjnej stawu uwarunkowana jest z jednej strony aktywnością grup organizmów tworzących biocenozę zbiornika wodnego: bakterii, pierwotniaków, grzybów, glonów, makrofitów o funkcji repozytorowej oraz zwierząt, a z drugiej strony filtracyjnymi właściwościami samego mineralnego podłoża [9, 19, 50]. Prawdopodobnie funkcjonująca strefa regeneracyjna determinuje zatem utrzymanie właściwych użytkowo wartości parametrów biofizyczno-chemicznych wody, eliminuje lub dezaktywuje nadmiar biogenów – głównie fosforu, ogranicza nadmierny rozwój szkodliwych glonów i sinic, likwiduje niebezpieczne bakterie chorobotwórcze i kałowe, usuwa z wody związki toksyczne oraz tworzy optymalne warunki do rozwoju fauny wodnej [29, 36, 50].

Efektywność TWs w przypadku bardziej skomplikowanych projektów architektonicznych dla ekobasenów uzupełniana być musi stosowaniem dodatkowych technologii uzdatniania wody. Opierając się one na procesach filtrowania wody przez materiał mineralny, gdzie zachodzą procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne, takie jak w filtrach pospiesznych i powolnych [13]. Stosowane są materiały nieaktywne (antracyt, piasek, chalcedonit), reaktywne ze składnikami wody (dolomit, marmur), sorpcyjne (węgiel aktywny) lub łączące sorpcję z wymianą jonową (opoka, grys wapienny). Filtrowanie wody, czyli jej przepływ przez materiał porowaty może odbywać się przy takiej budowie filtra, aby występowała różnica poziomów wody między wlotem do filtra,

a wylotem. Natężenie przepływu wody przez filtr jest funkcją różnicy wysokości zwierciadeł wody, która ma pokonać opory hydrauliczne w złożu.

Celem badań było określenie zależności funkcyjnej strat ciśnienia przy przepływie przez wybrane materiały filtracyjne o określonej wielkości ziaren dla określenia parametrów projektowych pozwalających na budowę filtrów o zadanej wydajności (prędkości filtrowania). Badano skałę węglanowo-krzemionkową (opokę) Rockfos® i grys wapienny.

Materiały i metody

Modele wyznaczania strat ciśnienia w procesie filtracji

Pomiar strat ciśnienia podczas filtrowania, czyli w warunkach eksploatacyjnych, a ich obliczanie podczas projektowania jest bardzo ważnym wskaźnikiem zachodzenia właściwych procesów technologicznych, czyli uzdatniania wody. Zmiany strat ciśnienia podczas filtrowania mogą być sygnałem występowania niewłaściwych zjawisk i koniecznością usunięcia problemów [25]. Obliczanie strat ciśnienia może być realizowane z wykorzystaniem analizy wymiarowej [46] lub wzorów empirycznych, w których podstawą modeli przepływu przez warstwę porowatą jest prawo Darcy, w którym straty ciśnienia są funkcją liniową prędkości przepływu i dlatego jest słuszne przy przepływie wody odbywającym się ruchem laminarnym oraz wzór Forchheimera, który może znaleźć zastosowanie zarówno w przypadku ruchu laminarnego, przejściowego, jak i burzliwego [49]. Wzór Darcy jest słuszny również dla przepływów dwufazowych przez złoża porowate [6]. Wzór odnoszony do warunków Forchheimera bywa przedstawiany w następującej formie [47]:

$$\frac{H}{L} = \alpha \cdot V + \beta \cdot V^2 \quad (1)$$

gdzie: H – wysokość straty ciśnienia, L – wysokość złoża, natomiast V prędkość filtracji obliczana jako stosunek natężenia przepływu do pola przekroju filtra. α i β współczynniki obliczane z oddzielnych wzorów [47].

Modyfikacje powyższych równań doprowadziły do zależności wyrażanych wzorami (2) Kozeny-Carmana [20], (3) Blake-Kozeny [20], które powstały dla cząstek kulistych (najczęściej był badany piasek) oraz wzór (4) Erguna [3] wykorzystywany do modelowania przepływów przez złoża zarówno kuliste, jak i odbie-

gające od tego kształtu np. kruszone, jak antracyt, chalcedonit, piroluzyt itp. [43];

$$\frac{H}{L} = \frac{180 \cdot (1 - \varepsilon_0)^2 \cdot v \cdot V}{\varepsilon_0^3 \cdot d^2 \cdot g} \quad (2)$$

$$\frac{H}{L} = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_0)^2 \cdot v \cdot V}{\varepsilon_0^3 \cdot d^2 \cdot g} \quad (3)$$

$$\frac{H}{L} = \frac{150 \cdot v \cdot (1 - \varepsilon_0)^2}{g \cdot \varepsilon_0^3} \cdot \left(\frac{1}{\psi \cdot d} \right)^2 \cdot V + \frac{1,75 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{g \cdot \varepsilon_0^3} \cdot \left(\frac{1}{\psi \cdot d} \right)^2 \cdot V^2 \quad (4)$$

gdzie: H – wysokość straty ciśnienia na grubości warstwy L , ε_0 – porowatość warstwy, v – kinematyczny współczynnik lepkości, V – prędkość filtracji, d – średnica ziaren złoża, ψ – sferyczność ziaren, g – przyspieszenie ziemskie.

Wzory (2) i (3) są wykorzystywane przy przepływie w warunkach ruchu laminarnego opisanego poprzez kryterium Forchheimera [52] lub liczbą Reynoldsa (wzór 5), gdy $Re < 5$ [31] lub $Re < 10$ [35]:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (5)$$

gdzie: V – prędkość przepływu, d – średnica ziaren złoża, ν – kinematyczny współczynnik lepkości.

Wzór Erguna jest bardziej uniwersalny, gdyż dobrze opisuje proces filtracji zarówno w warunkach przepływu laminarnego – wówczas dominuje człon pierwszy, w warunkach przepływu burzliwego ($Re > 100$ [35]) dominuje człon drugi natomiast w zakresie przejściowym oba człony są istotne w określeniu wyniku końcowego.

Są to wzory empiryczne uzyskane z wielu serii pomiarowych wykonywanych przez różnych badaczy, dlatego zawierają współczynniki liczbowe. Wywodzące się z praw hydrauliki wzory (2)÷(4) muszą zawierać wymiary drogi przepływu, które w materiale porowatym nie są możliwe do określenia. Średnica przelotów w sposób ciągły się zmienia omijając poszczególne ziarna jak również, ze względu na meandrowy charakter zmienia się także długość drogi. Z tego względu wprowadzono tzw. uśrednioną średnicę hydrauliczną, którą powiązano z średnicami ziaren i ich sferycznością oraz porowatością złoża związaną ze jego stopniem zagęszczenia. Wielkości ziaren złoża wynikają, przede wszystkim z wielkości oczek sit użytych do przygotowania materiału i wówczas w filtrze znajdują się ziarna o średnicach od

minimalnej do maksymalnej odpowiadających wielkości oczek. Jest to słuszne w przypadku ziół o ziarnach kulistych, jak piasek rzeczny. Natomiast w przypadku często stosowanych ziół kruszonych z większych brył, ziarna są nieregularne i ich rozrzut wielkości jest zdecydowanie większy. Wynika to z faktu iż, ziarna o kształtach smukłych, wydłużonych mogą przy odpowiednim ustawieniu przedostać się przez oczka w sicie o znacznie mniejszym wymiarze. Różnorodność kształtów ziaren [12] wynika z pęknięcia brył na drobniejsze frakcje według różnych dróg łupliwości.

Materiały

Rodzaje materiałów i ich charakterystyka

W wielkiej mnogości i różnorodności rozwiązań filtrów stosowane są różne minerały [10]. W przypadku opisywanych badań użyto grys wapienny i modyfikowaną opokę o nazwie handlowej Rockfos®.

Grys wapienny [27]

Kamień wapienny, pochodzi z Zakładów Przemysłu Wapienniczego TRZUSKAWICA S.A. w Siatkówce koło Kielc i pozyskiwany jest z własnego złoża wapieni jurajskich. Nazywany jest potocznie grysem filtracyjnym, lub grysem wapiennym i jako naturalny węgiel wapnia (CaCO_3) cechuje się wysoką zawartością cząsteczkową tego związku. Do celów filtracyjnych jest otrzymywany w wyniku mechanicznej przeróbki w/w surowca, (rozdrabnianie i sortowanie frakcji). Do niniejszych badań wykorzystywano ziarna o wielkości 4-8 mm.

Jego skład oraz istotne cechy zostały podane poniżej:

- CaCO_3 – min. 97,0 %
- MgCO_3 – max. 1,2 % SiO_2 – max. 2,5 %
- $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ – max. 0,7 %
- Gęstość nasypowa – 1540 kg/m^3
- Gęstość objętościowa ziarna – 2710 kg/m^3 .

Rockfos® [26]

Materiał filtracyjny produkowany jest w procesie dekarbonizacji (wypalania w wysokiej temperaturze) naturalnej skały węglanowo-krzemionkowej (opoki). Rockfos® jest surowcem wysoce reaktywnym wobec fosforu, ponieważ zawiera znaczne ilości pierwiastków, takich jak: wapń, krzem, glin i żelazo. Przez to cechuje się wysokimi wartościami odczynu ($\text{pH} = 11 \div 12$). Do niniejszych badań był wykorzystany materiał o granulacji 2-6 mm. Jego

gęstość nasypowa wynosi 730 kg/m^3 , a porowatość wewnętrzna wynosi około 50%, co sytuuje materiał w zakresie ziół mocno porowatych. Jego specyficzną własnością jest znakomita zdolność do wymiany jonów, a szczególnie do wiązania fosforanów. I ta własność jest okolicznością sprzyjającą do zastosowania materiału jako końcowy filtr w oczyszczalniach ścieków do usuwania pozostałości fosforu w ściekach wstępnie oczyszczonych.

Skład analizowanego materiału Rockfos® podany przez producenta – firmę Ceramika KUFEL została podana w tabeli 1.

Tabela 1. Udział procentowy najważniejszych składników materiału Rockfos®
Table 1. Percentage of the most important components of Rockfos® material

Składnik	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe	TiO ₂
Udział procentowy, %	43,336	36,047	5,932	2,856	1,340	0,960
Składnik	MgO	S	K ₂ O	P	Cl	MnO
Udział procentowy, %	0,938	0,654	0,489	0,480	0,237	0,117

Badanie gęstości i porowatości materiałów

Gęstość minerałów określano zgodnie z normą [38] przy wykorzystaniu piknometru oraz skażonego alkoholu etylowego. Jest to iloraz suchej masy złoża przez objętość próbki, która nie uwzględnia objętości porów zarówno w poszczególnych ziarenkach, jak i zawartych między tymi ziarenkami. Badania gęstości każdego minerału i każdej frakcji były wykonywane w czterech powtórzeniach, a wynik końcowy gęstości był średnią arytmetyczną wyników poszczególnych próbek.

Gęstość objętościowa [5] jest określana stosunkiem masy próbki złoża pobranego w warunkach naturalnych do jego objętości. Naturalny stan próbki definiuje się jako stan o nienaruszonej strukturze. Jednak w przypadku ziół filtracyjnych naturalny stan jest trudny do określenia, gdyż pod wpływem przepływu wody mogą następować przemieszczania się ziaren, zagęszczanie, sufozja itp. [15]. Gęstość objętościowa może mieć różne wartości, które będą zależały od stopnia upakowania ziaren. Ze względu na to, badanie gęstości objętościowej było wykonywane dla dwóch skrajnych stanów ziół, to jest stanu luźnego jako gęstość nasypowa i stanu zagęszczonego w wyniku wibracyjnego zagęszczenia ziół i pomiarów masy złoża w oznaczonej objętości przed zagęszczeniem i po zagęszczeniu.

Znajomość gęstości oraz gęstości nasypowej złoża w stanie niezakolmatowanym pozwalała na obliczenie porowatości zgodnie ze wzorami (6) (w stanie luźnym) i (7) w stanie zagęszczonym [2, 37]. Podczas przebiegu procesu filtrowania i osadzania się zanieczyszczeń porowatość się zmienia i silnie zależy od stężenia zawiesin [14].

$$\varepsilon_l = \frac{\rho_s - \rho_{pl}}{\rho_s} \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\rho_s - \rho_{pz}}{\rho_s} \quad (7)$$

gdzie: ρ_s – gęstość, kg/m^3 , ρ_{pl} – gęstość objętościowa w stanie luźnym, ρ_{pz} – gęstość objętościowa w stanie zagęszczonym, kg/m^3 , ε_l – porowatość w stanie luźnym, ε_z – porowatość w stanie zagęszczonym.

Ze względu na przypadkowe układanie się ziaren podczas mierzenia gęstości nasypowej i w konsekwencji rozrzut wyni-

ków pomiarów badania każdego minerału wykonywane były w ośmiu powtórzeniach. Wyniki końcowe były średnimi arytmetycznymi wyników poszczególnych serii.

Ogląd poszczególnych ziaren ziół pozwolił stwierdzić, że mają powierzchnię silnie porowatą, co zostało potwierdzone intensywnym wydostawaniem się pęcherzyków powietrza z ziaren zanurzonych w wodzie, szczególnie po podłączeniu naczynia do pompy podciśnieniowej. W takiej sytuacji konieczne było skorygowanie pomiarów porowatości poprzez korektę pomiarów gęstości. Było to konieczne, gdyż przy modelowaniu procesu filtrowania wody istotną rolę odgrywa porowatość międzyziarnowa, a porowatość wewnętrzną w tych pomiarach należało wyeliminować.

Z tego względu przeprowadzono eksperyment polegający na zanurzeniu ziaren ziół w alkoholu o precyzyjnie wyznaczonej gęstości (metodą piknometryczną). Po wypełnieniu porów alkoholem (po ustaniu wydobywania się pęcherzyków powietrza), ziarna wyjęto na sitko i poddano obciekaniu. Końcowym etapem było ważenie ziaren z porami wypełnionymi alkoholem. Wykorzystując masę ziaren suchych, ziaren nasyconych alkoholem oraz znając gęstość alkoholu i gęstość danego minerału, obliczono objętość porów przypadającą, na 1 g złoża (ml/g). Ta informacja pozwoliła na skorygowanie porowatości obliczonej ze wzoru (8) o porowatość wewnętrzną, zgodnie z zależnością [44]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_p \cdot (1 + v_w \cdot \rho_s)}{\rho_s} \quad (8)$$

gdzie: ρ_p – gęstość nasypowa [kg/m^3], v_w – jednostkowa objętość porów [m^3/kg], ρ_s – gęstość minerału [kg/m^3].

Średnica zastępcza ziaren

Ziarna stanowiące wypełnienie filtrów nigdy nie są jednakowe. Przygotowywane są przy pomocy zestawu sit, dlatego złoża w filtrach opisywane jest rozmiarami oczek sit – o największych i o najmniejszych oczkach. Wówczas jeśli nie są wykonywane dodatkowe badania średnicą zastępczą przyjmuje się jako średnia geometryczna wymiarów oczek w skrajnych sitach. Zakupione do badań złoża opisane zostały przez producentów jako: grys wapienny 4 – 8 mm, natomiast Rockfos® 2 – 6 mm. W wypełnieniu filtra, z jednakowym prawdopodobieństwem mogą się znaleźć dowolne cząstki z podanego zakresu, a w rzeczywistości występują także ziarna spoza tego zakresu, zarówno od strony ziaren większych, jak i mniejszych. W modelach opisujących zależność strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu wody podczas filtracji istotną wielkością jest średnica ziaren [3, 23], która obliczana jest jako średnica zastępcza. Jest wiele metod określania średnic zastępczych, do najważniejszych należą [34]:

- średnica objętościowa – średnica kuli o takiej samej objętości jak objętość cząstki (9).
- średnica powierzchniowa – średnica kuli o takim samym polu powierzchni jak pole powierzchni cząstki (10).
- średnica powierzchniowo-objętościowa – średnica kuli o takim samym stosunku pola powierzchni do objętości jak w przypadku cząstki (11).

$$D_V = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{\text{ziarna}}}{\pi}} \quad (9)$$

$$D_S = \sqrt{\frac{S_{\text{ziarna}}}{4 \cdot \pi}} \quad (10)$$

$$D_{SV} = \frac{D_V^3}{D_S^2} \quad (11)$$

Do wyznaczenia średnic zastępczych w niniejszych badaniach wybrano losowo po 40 ziaren każdego z minerałów i zmierzono ich długość, szerokość i wysokość. Wykorzystując te wymiary obliczono objętość oraz pole powierzchni każdego ziarna, a następnie wykorzystując wzory (9), (10) i (11) obliczono średnice zastępcze. Do obliczeń objętości i powierzchni każdego ziarna podchodzono indywidualnie analizując kształt bryły każdej mierzonej cząstki. Wśród obserwowanych kształtów najczęściej spotykane były te zbliżone do prostopadłościanu, czy ostrosłupa. Dość często występowała również bryła przypominająca dwa ostrosłupy połączone podstawami.

Sferyczności ziaren

Sferyczność jest definiowana jako stosunek powierzchni kuli mającej taką samą objętość, jak cząstka do powierzchni tej cząstki [4]. Jest to parametr nie tylko różniący ziarna o kształtach zaokrąglonych [41], ale szczególnie różniący ziarna powstałe z kruszenia większych brył, które mają zmienny kształt pękając wzdłuż płaszczyzn łupliwości [43]. Sferyczność mierzona bezpośrednio polega na wyznaczeniu trzech wymiarów charakterystycznych, które mogą być otrzymane przy wykorzystaniu takich metod, jak metoda optyczna, gęstościowa, objętościowa, ekspansji gazowej itp. [42, 48, 51]. Według Dharamajah i Cleasby [17] oraz Zenz [53], sferyczność ψ można obliczyć ze wzoru (12) lub (13):

$$\psi_1 = \left(\frac{D_V}{D_S} \right)^2 \quad (12)$$

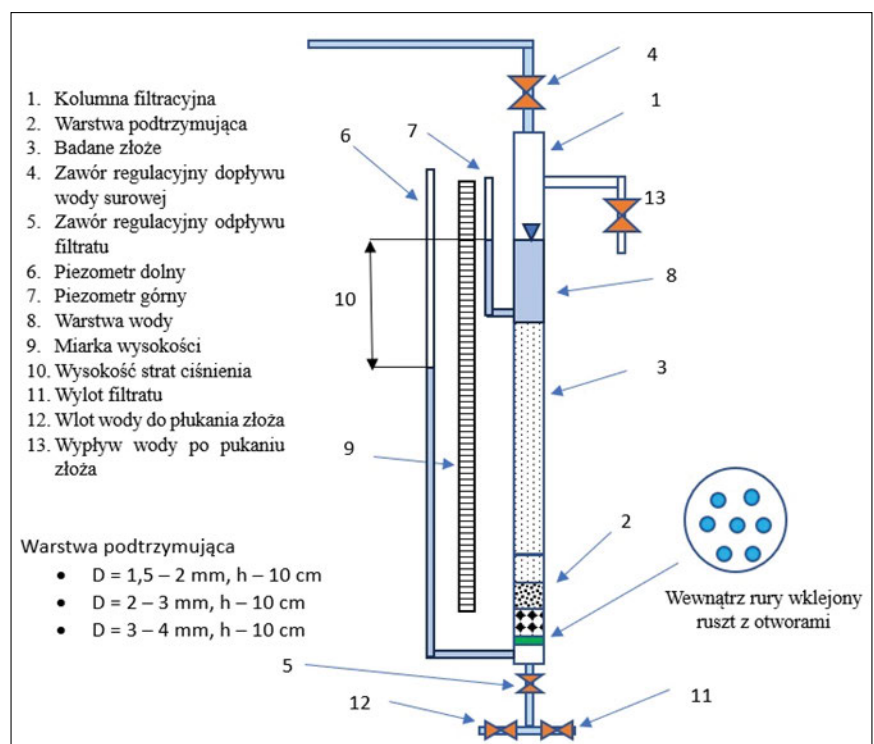
$$\psi_2 = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \quad (13)$$

Aby wyniki ze wzoru (13) były poprawne należy za „c” przyjąć najmniejszy wymiar ziarna a „a” i „b” pozostałe, z wymiarów otrzymanych z mierzenia ziaren opisanego wcześniej. Wykorzystując pomiary ziaren wykonane do określenia średnic zastępczych oraz wzorów (12) i (13) obliczono sferyczności, które były istotnym czynnikiem do modelowania wzorem Erguna (4).

Stanowisko pomiarowe

W celu realizacji badań laboratoryjnych na stanowisku pomiarowym zaprojektowano trzy eksperymentalne kolumny filtracyjne wykonane z rur z plexi wysokości 2m, o średnicy zewnętrznej 60 mm i grubości ścianki 5 mm. Schemat budowy kolumny pokazano na rys. 1, a wygląd zamontowanych 3-ech kolumn przygotowanych do podłączenia stanowiska rurek piezometrycznych przed wykonaniem badań w formie fotografii na rys. 2.

Kolumna filtracyjna (1) od spodu miała wklejony ruszt zbudowany z płyty z tworzywa sztucznego z wywierconymi otworami o średnicy mniejszej niż najmniejsze ziarna dolnej części warstwy podtrzymującej. Na ten ruszt została nasypa warstwa podtrzymująca (2) zbudowana z 3-ech warstw o wysokości 10 cm każda ułożonych z coraz mniejszych ziaren, tak, że dolna miała ziarna 3 ÷ 4 mm, środkowa 2 ÷ 3 mm i górna 1,5 ÷ 2 mm. Na warstwę podtrzymującą w każdym cyklu pomiarowym nasypywane było odpowiednie złożo (3) o miąższości 70 cm. W górnej części kolumny znajdowała się rurka dopływu wody z zamontowanym iglicowym zaworem regulacyjnym 1/4" (4) umożliwiającym ustalanie wielkości strumienia dopływowego wody. Analogiczny zawór (5) znajdował się pod kolumną i służył do regulowania wielkości wypływu wody. Pod rusztem w ściance kolumny (1) został wywiercony otwór,



Rys. 1. Schemat budowy kolumny filtracyjnej wraz z oprzyrządowaniem
 Fig. 1. Scheme of the construction of a filtration column with equipment

który połączono z dolną rurką piezometryczną (6) pozwalającą na pomiar strat ciśnienia podczas filtrowania wody. Podobny piezometr (7) wykonany w górnej części z połączeniem do kolumny nad złożem służył do kontrolowania wysokości warstwy wody (8) nad złożem.

Wysokość warstwy wody była zmienna i wpływała na natężenie przepływu wody przez filtr. Oczywiście podczas badań poziom wody w kolumnie i tym piezometrze był identyczny, a piezometr służył do bardziej precyzyjnego odczytu wysokości warstwy wody (8), w kolumnie. Do pomiarów różnic wysokości zwierciadeł wody (9) w piezometrach służyła miarka (10) przymocowana na stałe do kolumny i piezometrów. Podczas badań procesu filtracji woda wypływała przez zawór odcinający (1) i odpływała poza stanowisko pomiarowe. Do płukania oraz „układania” złoża służyły zawory (12) i (13). Przez zawór (12) wprowadzana była woda wodociągowa, która przy zamkniętym zaworze (11) płynęła do góry przez ruszt, warstwę podtrzymującą i złożo filtracyjne do góry i wypływała przez wylot zamykany zaworem (13).



Rys. 2.
Fotografia zestawu stanowiska do badania filtracji wody
Fig. 2. Photograph of the set of the stand for testing water filtration

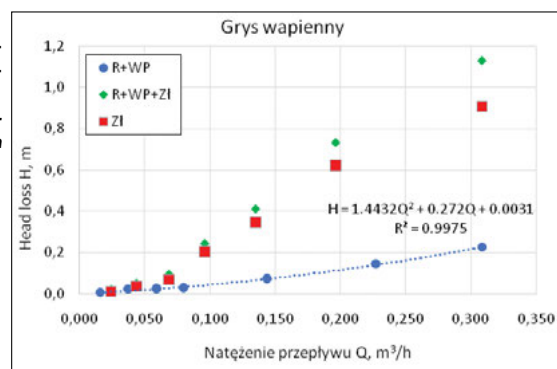
Metodyka pomiaru

Istotą metody pomiarowej było określenie zależności strat ciśnienia podczas filtrowania wody przez złożo w funkcji natężenia przepływu wody.

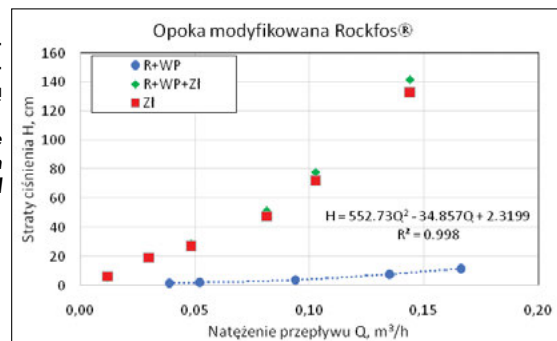
Do kolumny (1) wsypywano warstwę podtrzymującą według opisu na rys. 1. Następnie przepuszczano strumień wody od dołu (przez zawór 12) z taką intensywnością, aby uzyskać niewielką ekspansję warstwy podtrzymującej. Woda z kolumny

wypływała przez otwarty zawór 13. Po kilkunastominutowym przepływie wody zamykano powoli zawór 12 w celu sukcesywnego ułożenia się tej warstwy oraz zamykano zawór 13. Uruchamiano przepływ wody jak podczas filtracji, czyli z góry do dołu i przy pomocy zaworów 4 i 5 oraz przy całkowicie otwartym zaworze 11, a zamkniętym 12 odczekiwano do chwili ustabilizowania się poziomów wody w piezometrach. Ustabilizowane poziomy zwierciadła wody w piezometrach świadczyły o ustalonych warunkach, czyli tyle wody wpływało do kolumny ile wypływało. Przy stabilnych warunkach dokonywano dwóch pomiarów, to jest różnic wysokości zwierciadeł wody w piezometrach 10 oraz natężenia przepływu wody metodą naczyniową. Cylinder 1200 ml był podstawiany pod wylot i mierzony był stoperem czas jego napełnienia. Po wykonaniu pomiaru zmieniano stopnie otwarcia zaworów 4 i 5, stabilizowano inną wartość przepływu, a następnie mierzono różnice zwierciadeł wody w piezometrach i natężenie przepływu wody. Powtarzając kilkakrotnie tę procedurę otrzymywano zależność strat ciśnienia wody przy przepływie przez ruszt oraz warstwę podtrzymującą. Następnie na warstwę podtrzymującą nasypywano badane złożo, strumieniem wody z dołu do góry układano warstwę złoża, a następnie wykonywano pomiary powtarzając dokładnie tę samą procedurę. Po wykonaniu również kilku pomiarów otrzymywano zależność strat ciśnienia wody przy przepływie przez ruszt, warstwę podtrzymującą oraz warstwę filtracyjną.

Rys. 3.
Zależność strat ciśnienia od natężenia przepływu w kolumnie filtracyjnej z grysem wapiennym
Fig.3. Dependence of pressure losses on flow rate in a filtration column filled with limestone grit



Rys. 4.
Zależność strat ciśnienia od natężenia przepływu w kolumnie filtracyjnej z opoką modyfikowaną Rockfos®
Fig. 4. Dependence of pressure losses on flow rate in a filtration column with Rockfos®, modified rock.



Kolejno, zarówno punkty pomiarowe otrzymane z badań warstwy rusztu i warstwy podtrzymującej, jak i badań rusztu, warstwy podtrzymującej i złoża aproksymowano krzywą drugiego stopnia. Rozwiązując układ obu zależności otrzymywano wielkość poszukiwaną, czyli zależność funkcyjną strat ciśnienia przy przepływie wody przez badane złożo w funkcji natężenia przepływu wody. Ta zależność pozwoliła na weryfikację możliwości modelowania wzorem Erguna (4) i doboru jak najlepiej dopasowujących się zestawów liczb: sferyczności i średnicy zastępczej ziaren.

Statystyka pomiarów

Do oceny wyników pomiarów i obliczeń średnic zastępczych oraz sferyczności wykorzystano statystykę opisową – średnią, medianę, odchylenie standardowe, maksimum, minimum i współczynnik zmienności. Normalność rozkładów badano testem Shapiro-Wilka.

Wyniki i ich omówienie

Wyniki badań strat ciśnienia podczas filtrowania wody przez ruszt i warstwę podtrzymującą (R+VWP), całego zestawu filtracyjnego, czyli rusztu, warstwy podtrzymującej i złoża (R+VWP+Zł) oraz w konsekwencji przez samo złożo filtracyjne (Zł) zostały pokazane na rys. 3 i 4. Rys. 3 pokazuje zależność strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu dla grysłu wapiennego a rys. 4 opoki modyfikowanej Rockfos®.

Niebieskimi znacznikami (rys. 3 i 4) pokazano charakterystykę zestawu ruszt

i warstwa podtrzymująca, które różniły się dla poszczególnych badań, gdyż warstwa podtrzymująca w każdym przypadku podczas nasypywania układa się przypadkowo. Na tych wykresach pokazano tę zależność aproksymując punkty pomiarowe funkcją wielomianową drugiego stopnia. Zielonymi znacznikami pokazano charakterystykę zestawu ruszt, warstwa podtrzymująca i złożo. Odejmując od rzędnych każdego z tych punktów obliczone wartości strat z wzorów aproksymacyjnych otrzymano charakterystykę strat ciśnienia samego złoża – pokazaną czerwonymi znacznikami. Te punkty stały się podstawą analizy pokazanej na wykresach rys. 6-9.

W tabeli 2 pokazano miary statystyczne, takie jak średnia, mediana, odchylenie standardowe, maksimum, minimum i współczynnik zmienności kluczowych wielkości wykorzystywanych do wzoru Erguna, to jest średnicy objętościowej D_V , średnicy powierzchniowej D_S , średnicy objętościowo-powierzchniowej (Sautera) D_{SV} oraz związane ze średnicami ziaren ich sferyczności ψ_1 i ψ_2 obliczane przy pomocy wzorów pokazanych w tabeli.

Jak widać z tabeli 2 dla obliczeń średnic zastępczych, jak i wartości sferyczności – przy wykorzystaniu różnych metod – uzyskano wartości znacznie różniące się od siebie. Średnice obliczane z oszacowanych powierzchni cząstek są znacząco większe od średnic objętościowych. Najniższe wartości otrzymano dla średnic powierzchniowo-objętościowych. Tak duże różnice mogą prowadzić do błędnych wyników strat ciśnienia, szczególnie, że dochodzi sferyczność, która przy zastosowaniu różnych wzorów daje także wyniki znacznie się różniące. Wykonany test Shapiro-Wilka wykazał normalność rozkładu wyników średnic zastępczych i sferyczności dla gysu wapiennego i formalnie brak normalności rozkładu dla materiału Rockfos®, chociaż otrzymane wartości statystyk były niewiele mniejsze od wartości krytycznej.

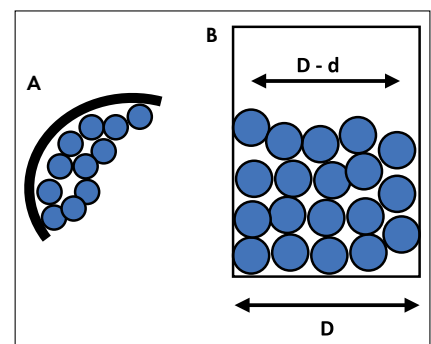
Duży rozrzut średnic zastępczych, odchyleń standardowych i współczynników zmienności oraz obecność ziaren o dużych wymiarach wymusiły uwzględnienie w obliczeniach wystąpienia efektu przysięnnego, czyli obszarów podwyższonej porowatości blisko ścianek kolumny filtracyjnej. W takim przypadku przepływ przez

warstwę filtracyjną nie jest jednakowy – przy ściankach złożo o większej porowatości przepuszcza większy strumień niż złożo wewnątrz kolumny filtracyjnej. Powiększona porowatość przy ściankach może być obliczona ze wzoru (14) [18]

$$\varepsilon = \varepsilon_b + 0,01 \cdot \left[e^{\frac{10,686}{D/d}} - 1 \right] \quad (14)$$

gdzie: ε – porowatość złoża przy ściankach, ε_b – porowatość wewnątrz złoża, D – średnica filtru, d – średnica zastępcza ziaren złoża.

Efekt przysięnni był analizowany przez wielu badaczy nie tylko podczas filtracji [1, 11, 16, 24, 28, 32, 33, 40], ale także podczas sedimentacji zawiesin [7]. Zjawisko to schematycznie pokazano na rys. 5.



Rys. 5.

Schematyczne pokazanie zjawiska efektu ściennego: A – wycinek filtra o kształcie walcowym [45], B – obszar oddziaływania efektu przysięnnego [18]

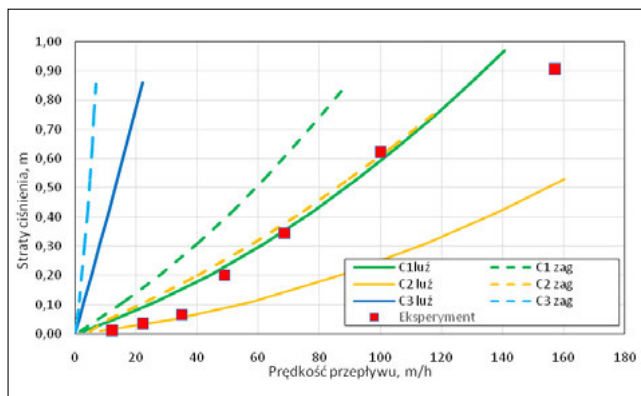
Fig. 5. Schematic representation of the wall effect phenomenon: A – cylindrical filter section [45], B – area of the wall effect [18]

Kluczowe jest określenie jak głęboko w obszar złoża sięga strefa efektu ściennego. Di Felice i Gibilaro [18] przyjęli, co pokazano na rys. 5, że jest to połowa średnicy ziaren. Riess et al. [40] z obliczeń symulacyjnych 2 średnice. Wskazano także istotną zależność iż porowatości układają się sinusoidalnie w kierunku radialnym od ścianek [16, 30, 33, 40]. Analizując wygląd złożo poprzez ścianki kolumn przyjęto, że zwiększona porowatość przy ściankach obliczana według wzoru (14) będzie przyjęta dla pierścienia zawartego między średnicą wewnętrzną kolumny a średnicą zmniejszoną o jedną średnicę zastępczą ziaren. Wewnętrzna część złoża miała porowatość zgodnie z badaniami opisanymi wcześniej.

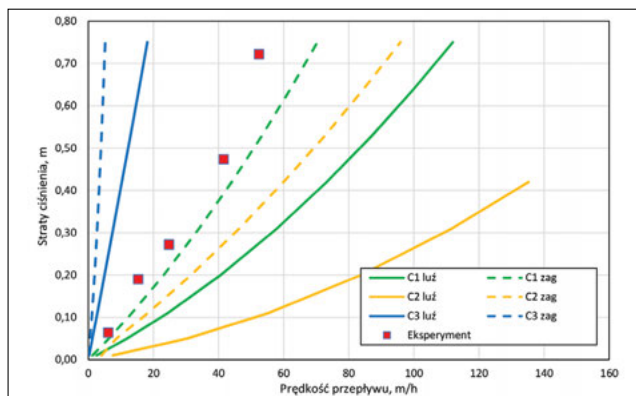
Mnogość wyników, różniących się od siebie pociągnęła za sobą konieczność weryfikacji, która z wartości średnicy zastępczej oraz sferyczności daje w modelu Erguna wyniki najbardziej zbliżone do badań eksperymentalnych. Wówczas można zasugerować zestaw liczb możliwych do

Tabela 2. Charakterystyczne dane materiałów złożo
Table 2. Characteristic data of beds materials

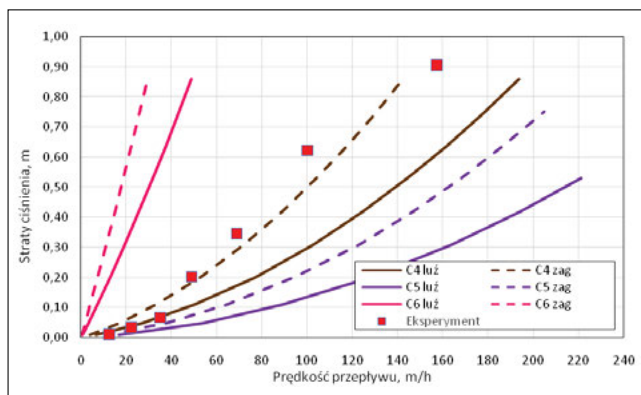
Parametry	Miary statystyczne	Grys wapienny	Rockos®
Średnica objętościowa D_V	Średnia	4.628	3.838
	Mediana	4.335	3.823
	Odchylenie standardowe	1.192	0.769
	Maksimum	7.326	5.445
	Minimum	2.610	2.544
	Współczynnik zmienności	0.258	0.200
Średnica powierzchniowa D_S	Średnia	8.617	6.868
	Mediana	7.969	6.899
	Odchylenie standardowe	2.033	1.427
	Maksimum	12.866	9.803
	Minimum	5.661	4.775
	Współczynnik zmienności	0.236	0.208
Średnica objętościowo-powierzchniowa (Sautera) $D_{SV} = \frac{D_V^3}{D_S^2}$	Średnia	1.347	1.200
	Mediana	1.365	1.171
	Odchylenie standardowe	0.424	0.230
	Maksimum	2.422	1.679
	Minimum	0.555	0.722
	Współczynnik zmienności	0.315	0.192
Sferyczność $\psi_1 = \left(\frac{D_V}{D_S} \right)^2$	Średnia	0.287	0.313
	Mediana	0.300	0.317
	Odchylenie standardowe	0.034	0.012
	Maksimum	0.331	0.329
	Minimum	0.195	0.271
	Współczynnik zmienności	0.118	0.038
Sferyczność $\psi_2 = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$	Średnia	0.484	0.651
	Mediana	0.471	0.659
	Odchylenie standardowe	0.210	0.128
	Maksimum	0.994	0.928
	Minimum	0.134	0.303
	Współczynnik zmienności	0.434	0.128
Porowatość w stanie luźnym		0.5196	0.5315
Porowatość w stanie zagęszczonym		0.4625	0.4644



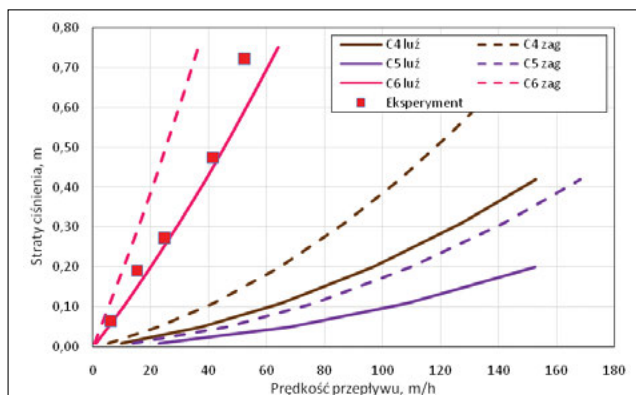
Rys. 6. Wysokości strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu z badań eksperymentalnych grysów wapiennego i z wykorzystaniem wzoru Erguna z kombinacją średnic zastępczych i sferyczności dla złóż w stanie luźnym i zagęszczonym: C1 – $D_v \psi_1$; C2 – $D_s \psi_1$; C3 – $D_{sv} \psi_1$
Fig. 6. Amounts of pressure losses as a function of flow rate from experimental tests of limestone grit and using the Ergun formula with a combination of equivalent diameters and sphericity for loose and compacted beds: C1 – $D_v \psi_1$; C2 – $D_s \psi_1$; C3 – $D_{sv} \psi_1$



Rys. 8. Wysokości strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu z badań eksperymentalnych opoki Rockfos® i z wykorzystaniem wzoru Erguna z kombinacją średnic zastępczych i sferyczności dla złóż w stanie luźnym i zagęszczonym: C1 – $D_v \psi_1$; C2 – $D_s \psi_1$; C3 – $D_{sv} \psi_1$
Fig. 8. Amounts of pressure losses as a function of flow rate from experimental tests of the Rockfos® rock and using the Ergun formula with a combination of equivalent diameters and sphericity for loose and compacted beds: C1 – $D_v \psi_1$; C2 – $D_s \psi_1$; C3 – $D_{sv} \psi_1$



Rys. 7. Wysokości strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu z badań eksperymentalnych grysów wapiennego i z wykorzystaniem wzoru Erguna z kombinacją średnic zastępczych i sferyczności dla złóż w stanie luźnym i zagęszczonym: C4 – $D_v \psi_2$; C5 – $D_s \psi_2$; C6 – $D_{sv} \psi_2$
Fig. 7. Amounts of pressure losses as a function of flow rate from experimental tests of limestone grit and using the Ergun formula with a combination of equivalent diameters and sphericity for loose and compacted beds: C4 – $D_v \psi_2$; C5 – $D_s \psi_2$; C6 – $D_{sv} \psi_2$



Rys. 9. Wysokości strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu z badań eksperymentalnych opoki Rockfos® i z wykorzystaniem wzoru Erguna z kombinacją średnic zastępczych i sferyczności dla złóż w stanie luźnym i zagęszczonym: C4 – $D_v \psi_2$; C5 – $D_s \psi_2$; C6 – $D_{sv} \psi_2$
Rys. 9. Amounts of pressure losses as a function of flow rate from experimental tests of the Rockfos® rock and using the Ergun formula with a combination of equivalent diameters and sphericity for loose and compacted beds: C4 – $D_v \psi_2$; C5 – $D_s \psi_2$; C6 – $D_{sv} \psi_2$

zastosowania w projektowaniu filtrów do basenów zawierających badane materiały. Wykonano obliczenia kombinacyjne wykorzystując 2 rodzaje złóż i w każdym 3 zestawy średnic, 2 zestawy sferyczności i 2 zestawy porowatości. Dało to po 12 różnych przypadków dla każdego złoża, a wyniki obliczeń w porównaniu do wyników eksperymentów pokazano na rys. 6 – 9.

Wykresy pokazane na rys. 6 – 9 nie dają jednoznacznej odpowiedzi jak, należałoby obliczać średnicę zastępczą przy obliczeniach modelowych do projektowania filtrów w basenach kąpielowych. Punkty uzyskane z pomiarów przy przepływie wody przez grys wapienny przy wykorzystaniu sferyczności obliczanej wzorem ψ_1 w dolnym zakresie prędkości filtracji (do ok. 40 m/h) układają się zgodnie z kombinacją danych C2, czyli dla

objętościowej średnicy ziaren oraz luźnego zagęszczenia. Przy wyższych prędkościach filtracji złoża zagęszcza się i punkty pomiarowe układają się wzdłuż krzywych odniesionych do C1 luź i C2 zag. Przy obliczeniu sferyczności według wzoru ψ_2 wyniki eksperymentu układają się blisko zakresu C4. Początkowo, do prędkości filtracji ok. 40 m/h układają się według luźnego upakowania, a powyżej według złoża zagęszczonego.

Analiza postaci wzoru Erguna pozwala stwierdzić, że w obu członach średnica zastępcza występuje zawsze w połączeniu ze sferycznością, dlatego należałoby analizować wykresy w funkcji iloczynu „ $d \cdot \psi$ ”, co pokazano w tabeli 3.

Zarówno dla grysów wapiennych jak i materiału Rockfos® uzyskano najbliższe pomiarom wyniki dla iloczynów różnych

Tabela 3. Wartości iloczynów różnych kombinacji średnic zastępczych i sferyczności (wg oznaczeń z tabeli 2)

Table 3. Values of the products of various combinations of equivalent diameters and sphericity (according to the designations in Table 2)

Material		D_v	D_s	D_{sv}
Grys wapienny	ψ_1	1.328	2.473	0.387
	ψ_2	2.241	4.174	0.653
Rockos®	ψ_1	1.203	2.153	0.376
	ψ_2	2.497	4.468	0.781

kombinacji średnic zastępczych i sferyczności oznaczonych wyłuszczonej czcionką w tabeli 3. Uogólniając można stwierdzić, że w obu przypadkach dobrze sprawdziły się wyrażenia na obliczenie średnicy zastępczej D_v oraz sferyczności ψ_2 obliczanej ze wzoru zamieszczonego w tabeli 2.

Wykonane badania zależności strat ciśnienia w funkcji prędkości filtracji przekraczały dość znacznie typowy zakres prędkości filtracji stosowany w klasycznych filtrach pospiesznych szczególnie ciśnieniowych [13]. W filtrach do naturalnych basenów kąpielowych pracujących, jako otwarte i w sposób ciągły jakość wody powinna się dobrze stabilizować w odróżnieniu od filtrów z przerywaną filtracją [54]. W takich przypadkach prędkość filtrowania będzie znacznie mniejsza, co przełoży się na małe różnice zwierciadeł wody nad złożem i za filtrem, chociaż wystąpią różnice związane ze zmianami temperatury [55].

Wnioski

Przedstawione wyniki badań i obliczeń pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. W otwartych filtrach stosowanych do oczyszczania wody w stawach kąpielowych stosuje się minerały o większych rozmiarach ziaren niż w klasycznych filtrach pospiesznych typu pokoagulacyjnego, lub w odżelaziaczach czy odmanganiaczach. Dlatego przy takich ich wielkościach można było pomierzyć metodą bezpośrednią wymiary wybranych losowo ziaren, które w sensie statystycznym odzwierciedlały wymiary ziaren w całej populacji. Uzyskane w ten sposób wymiary ziaren pozwoliły na obliczenie średnic zastępczych oraz sferyczności według wzorów podawanych w różnych publikacjach. Wyniki obliczeń pokazały niespójność, co przekłada się na dylemat, które zależności odzwierciedlają właściwe relacje.
2. Przy ziarnach o wymiarach handlowych, grys 4 – 8 mm, Rockfos® 2 – 6 mm, średnice objętościowe D_V wyniosły, odpowiednio 4,628 mm i 3,838 mm, powierzchniowe D_S 8,617 mm i 6,868 mm, objętościowo-powierzchniowe (Sautera) 1,347 mm i 1,200 mm. Jak widać jedynie średnica objętościowa mieściła się w zakresie wymiarów podanych przez producenta. Średnica tak obliczona była stosunkowo bliska średniej geometrycznej wymiarów skrajnych, które dla grysu wyniosły 5,657 mm natomiast Rockfos® 3,464 mm.
3. Ogląd cząstek badanych materiałów pokazywał, że podczas przygotowywania grys kruszył się bardziej nieregularnie tworząc bryły o trudnych do opisanie kształtach. Pokazują to współczynniki zmienności, które miały

większe wartości dla grysu niż Rockfos®. Dla średnic wymienionych we wniosku 2 współczynniki zmienności wyniosły, odpowiednio dla grysu i Rockfos® 0,258 do 0,200; 0,236 do 0,208 i 0,118 do 0,038.

4. W zależności od metody obliczania również sferyczności różniły się dość znacznie. W tym przypadku sferyczności ψ_1 (tabela 3) obliczane jako zależność od średnic objętościowych i powierzchniowych dały wyniki: dla grysu 0,287, a dla Rockfos® 0,313. Są to wyniki mało realne, gdyż zgodnie z definicją sferyczności musiałyby to być kształty bardzo znacząco odbiegające od kształtu kuli (bardzo wydłużone, bardzo płaskie itp.). Wyniki z wykorzystaniem wzoru ψ_2 (tabela 3) świadczyły o znacznie wyższych wartościach sferyczności, bo wyniosły, odpowiednio 0,484 i 0,651.
5. Analiza porównawcza wyników obliczeń i pomiarów na stanowisku badawczym pokazała, że najbliższe sobie rezultaty otrzymuje się przy wykorzystaniu średnic objętościowych (wzór 9) i sferyczności obliczanej ze wzoru (13).
6. Zakres badań prędkości filtracji wykraczał poza typowe wartości stosowane w filtrach pospiesznych. Po próbach badań eksperymentalnych, które pozwoliły na takie działanie świadomie rozszerzono ten zakres uzyskując znaczny udział członu przepływu burzliwego.
7. Filtry stosowane w naturalnych basenach kąpielowych nie są regenerowane poprzez płukanie wsteczne, dlatego stopień zagęszczenia, a co za tym idzie porowatość wynikają z naturalnego początkowego ułożenia. W takich filtrach porowatość międzyziarnowa złoża jest z reguły mniejsza niż porowatość w stanie luźnym, lecz nie obserwuje się dalszego zagęszczania podczas przepływu wody. Niewątpliwie podczas dłuższego okresu eksploatacji, w wyniku osadzania się zawieszin oraz rozwoju różnego rodzaju mikroorganizmów, porowatość złoża będzie się zmniejszać, lecz nie będzie to wynikało z gęstszego upakowania. Opisanie matematyczne zmian porowatości w funkcji czasu na obecnym etapie nie jest możliwe i wymaga dalszych badań.
8. Analizy strat ciśnienia przy przepływie przez wybrane materiały filtracyjne uzupełnione badaniami terenowymi w warunkach funkcjonowania ekoba-

senów posłużą do określenia parametrów projektowych wysokowydajnych komór filtracyjnych o dużym potencjale komercyjnym.

LITERATURA

- [1] Aghdam E.A. 2014. Wall effect on determination of laminar burning velocity in a constant volume bomb using a quasi-dimensional model. *Applied Mathematical Modelling* 38 (2014) 5811–5821. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2014.04.014>
- [2] Ahad T, Kanth T A, Nabi S. 2015. Soil bulk density as related to texture, organic matter content and porosity in Kandi soils of District Kupwara (Kashmir valley), India. *IJSR – Int J Sci Res.* 4: 198–200. ISSN No 2277 – 8179
- [3] Akgiray Ö., Saatçı A.M. 2001. A new look at filter backwash hydraulics. *Water Science and Technology: Water Supply Vol 1 No2* pp 65–72 © IWA Publishing, DOI: 10.2166/ws.2001.0022
- [4] Allen T. 1968: Particle size measurement. Chapman and Hall Ltd. London.
- [5] Al-Shammari A.A.G., Kouzani A.Z., Kaynak A., Khoo S.Y., Norton M., GATES W. 2018. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. *Pedosphere* 28(4): 581–596, doi:10.1016/S1002-0160(18)60034-7
- [6] Ayodele O.R. 2006: Theoretical analysis of viscous coupling in two-phase flow through porous media. *Transport in Porous Media*, vol. 64, pp. 171–184. <https://doi.org/10.1007/s11242-005-2809-8>
- [7] Buratto B., Usher S.P., Parris D., Scales P.J. 2014. Wall effects during settling in cylinders. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 449 (2014) 157–169, <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.02.045>
- [8] Bus, A.Z., Karczmarczyk, A.A. 2015. Kinetic and sorption equilibrium studies on phosphorus removal from natural swimming ponds by selected reactive materials. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(9): 1–6.
- [9] Casanovas-Massana, A., Blanch, A.R. 2013. Characterization of microbial populations associated with natural swimming pools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 216 (2013) 132–137.
- [10] Cescon A. and Jiang J.-Q. 2020, Filtration Process and Alternative Filter Media Material in Water Treatment. *Water* 2020, 12, 3377; doi:10.3390/w12123377
- [11] Cheng N.-S. 2011. Wall effect on pressure drop in packed beds. *Powder Technology* 210 261–266, doi:10.1016/j.powtec.2011.03.026
- [12] Cruz-Matías I., Ayalab D., Hillerc D., Gutschd S., Zachariasd M., Estradée S., Peiróe, F. 2019. Sphericity and roundness computation for particles using the extreme vertices model. *Journal of Computational Science* 30, 28–40, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.11.005>
- [13] Dąbrowski W. 2017. Porównanie filtracji powolnej z pospieszną i infiltracją brzegową. *Instal*, 4, (383), 49-53
- [14] Dąbrowski W. 2023: Wątpliwości dotyczące modelowania matematycznego filtracji pospiesznej wody. *Instal*, 12, (457), 113-116, DOI 10.36119/15.2023.12.8
- [15] Dąbrowski W. 2023: Zjawiska, których nie uwzględniano w modelowaniu filtracji. *Instal*, 12, (457), 116-119, DOI 10.36119/15.2023.12.19
- [16] De Klerk A. 2003. Voidage Variation in Packed Beds at Small Column to Particle Diameter Ratio. *AIChE Journal*, August, 49, 8, 2022-2029

- [17] Dharmarajah A.H., Cleasby J.L. 1986: Predicting the expansion behavior of filter media. *Journal AWWA*, December pp. 66-76
- [18] Di Felice R., L.G. Gibilaro L.G. 2004. Wall effects for the pressure drop in fixed beds. *Chemical Engineering Science*, 59, 14, July, 3037-3040. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.03.030>
- [19] FLL. 2011. Recommendations for Planning, Construction, Servicing and Operating of Outdoor Swimming Pools with Biological Water Purification (Swimming and Bathing Ponds).
- [20] Flint L.E., Selker J.S. 2003: Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic tuffs. *Advances in Water Resources*, vol. 26, pp. 561-571. DOI:10.1016/S0309-1708(02)00182-3
- [21] Florentin, A., Hautemanière, A. & Hartemann, P. 2011. Health effects of disinfection by-products in chlorinated swimming pools. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 214: 461–469.
- [22] Giampaoli S., Garrec N., Donzè G., Valeriani F., Erdinger L., and Spica V.R. 2014 . Regulations concerning natural swimming ponds in Europe: considerations on public health issues. *Journal of Water and Health*, Sept.12. 3. 564-572, DOI: 10.2166/wh.2014.211
- [23] Graciano-Urbe J., Pujol T., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Arbat G., de Cartagena F.R. 2021. Assessment of Different Pressure Drop-Flow Rate Equations in a Pressurized Porous Media Filter for Irrigation Systems, *Water* 13, 2179. <https://doi.org/10.3390/w13162179>
- [24] Gursch J., Giner R., Krammer G. Influence of Wall Effects on Filter Upscaling during Solid-Liquid Filter Tests. *Chem. Eng. Technol.* 2016, 39, No. 3, 417–424, DOI: 10.1002/ceat.201500312
- [25] Jonsson L.M., Björnelius B. 2022. Dynamic and initial head loss in full-scale wastewater filtration and measures to prevent long-term initial head loss. *Water Practice & Technology Vol 17 No 7*, 1390 doi: 10.2166/wpt.2022.064
- [26] Katalog – Ceramika KUFEL Suchynia ul. Podmiejska 12, 23-200 Kraśnik <http://www.ceramika-kufel.pl/rockfos/> (dostęp 8.04.2024)
- [27] Katalog – Zakłady Przemysłu Wapienniczego TRZUSKAWICA S.A. Sitkówka 24, 26-052 Nowiny <https://www.trzuskawica.pl/> (dostęp 8.04.2024)
- [28] Kwapinski W., Winterberg M., Tsotsas E., Mewes D. 2004. Modeling of the wall effect in packed bed adsorption. *Chem. Eng. Technol.* 27, 11, DOI: 10.1002/ceat.200407001
- [29] Langergraber G., Dotro G., Nivala J., Rizzo A., Stein O.R. 2019. Wetland Technology Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands. Book, January, Scientific and Technical Report No. 27, IWA Publishing
- [30] Lovreglio P., Das S., Buist K.A., and E. A. J. F. Peters E.A.J.F. 2018. Experimental and Numerical Investigation of Structure and Hydrodynamics in Packed Beds of Spherical Particles. *AIChE Journal*, May, 64, 5, 1896-1907, DOI 10.1002/aic
- [31] Matyka M., Mądrala M. 2017. Granica laminarnego przepływu wody w obsypce żwirowej studni eksploatacyjnej. *Przegląd Geologiczny*, vol. 65, nr 11/2, 2017
- [32] Mehta D., Hawley M.C.. 1969. Wall effect in packed columns. *I&EC Process Design and Development*, 8. 2 April, 280-282
- [33] Mueller G.E. 2019. A modified packed bed radial porosity correlation. *Powder Technology*, 342, 15, 607-612 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.030>
- [34] Orzechowski Z. 1990. *Przepływy dwufazowe*. PWN Warszawa
- [35] Orzechowski Z., Prywyer J., Zarzycki R. 1997. *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*. WNT Warszawa
- [36] Pilon-Smits, E. 2005. Phytoremediation. *Fort Collins: Annual Reviews*.
- [37] PN-B-06714:1976. Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie porowatości
- [38] PN-EN 1097-7/2001 – Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna
- [39] Radic, D., Gujanic, V., Petricvic, J., Raicevic, V., Lalevic, B., Rudic, Z., Bozic, M. 2013. Macrophytes as remediation technology in improving Ludas lake sediment. *Fresenius Environmental Bulletin* 22(6): 1787-1791
- [40] Riess P.M.B., Briesen H., Nasato D.S. 2022. Assessing the wall effects of packed concentric cylinders and angular walls on granular bed porosity. *Granular Matter*, 24:36, <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01197-0>
- [41] Rorato R., Arroyo M., Andò E., Gens A. 2019. Sphericity measures of sand grains. *Engineering Geology* · April, DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.04.006
- [42] Scheidegger A.E. 1960: The physics of flow through porous media. University Toronto Press
- [43] Siwiec T 2007. The sphericity of grains of filtration beds applied for water treatment on examples of selected minerals. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, vol. 10, Issue 1, *Topic Civil Engineering*, 6 March
- [44] Siwiec, T. 2007B. Warunki plukania jednowarstwowych i dwuwarstwowych filtrów pospiesznych, *Wyd. SGGW Warszawa*
- [45] Siwiec T., Okoński R.: 2014. Influence diameter filter and diameter grains bed on efficiency of deironing water with different concentrations of iron. *Instal*, 1, 42-46
- [46] Taaa H., Wua Z.,Yangc Y., Zhoud Y., Lia Q., Mahemujianga A.,Jianga Y. 2023. Dimensional analysis-based head loss calculation for the micro-pressure filtering and washing tank. *Water Supply Vol 23 No 5*, 1729 doi: 10.2166/ws.2023.083
- [47] Trussell R.R., Chang M. 1999: Review of flow through media as applied to head loss in water filters. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 125, no. 11, November, pp. 998-1006, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:11\(99](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:11(99)
- [48] Ullah A., Hong K., Gao Y., Gungor A., Zaman M. An overview of Eulerian CFD modeling and simulation of non-spherical biomass particles. *Renewable Energy* 141 (2019) 1054e1066, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.074>
- [49] Venkataraman P., Rao P.R.M. 1998: Darcian, transitional and turbulent flow through porous media. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 124, no. 8, August, pp. 840-846, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:8\(840\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:8(840))
- [50] Walczak W., Serafin A., Siwiec T. 2023. Natural Swimming Ponds as an Application of Treatment Wetlands—A Review. *Water* 2023, 15(10), 1878; <https://doi.org/10.3390/w15101878>
- [51] Wei D., Wang I., Zhao B. 2018, A simple method for particle shape generation with spherical harmonics. *Powder Technology* 330 (2018) 284–291, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.006>
- [52] Zeng Z., Grigg R. 2006. A Criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media. *Transport in Porous Media* 63: 57–69 © Springer DOI 10.1007/s11242-005-2720-3
- [53] Zenz F.A., Othmer D.F. 1960: Fluidization and fluid-particle systems. Reinhold Publishing Corporation, New York
- [54] Zielina M. 2021. Analiza jakości filtratu z filtrów pospiesznych pracujących z przerwami. *Instal*, 6, 34-38, DOI 10.36119/15.2021.6.4
- [55] Zielina M., Dąbrowski W. 2021: Energy and Water Savings during Backwashing of Rapid Filter Plants. *Energies* 2021, 14, 3782. <https://doi.org/10.3390/en14133782>

Artykuł powstał w ramach pracy doktorskiej pt. „Opracowanie i wdrożenie modułowego systemu filtracji wody dla naturalnych stawów kąpielowych” przygotowanej przez Wojciecha Walczaka. Badanie zostało sfinansowane przez Ministerstwo Edukacji i Nauki (Polska), w ramach projektu nr DWD/5/0334/2021.